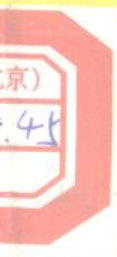


二氧化碳驱油机理 及工程设计

[美] M.A. 克林斯

石油工业出版社



登录号	127233
分类号	TE 357.45
种次号	001

二氧化碳驱油机理及工程设计

〔美〕 M.A.克林斯

程绍进 译 罗英俊 校



石油0120968

石油工业出版社

0.38/11

内 容 提 要

本书主要是结合美国国内的油田情况,介绍了 CO_2 驱提高石油采收率的基本机理及一些工程设计。

本书中讨论了为什么 CO_2 能够使原油流动和提高石油采收率的几种机理,介绍了一些油藏模拟方法和注 CO_2 已取得成功的油藏类型,并对 CO_2 注入工程的现场设计、数据收集及经济分析都做了简单综述。重点探讨了 CO_2 与地层流体的反应情况,对 CO_2 、水、原油之间的相互作用及对采油的影响进行了分析,同时介绍了一些必要的试验。

本书适用于油田有关科技人员及有关大专院校师生学习参考。

MARK A. KLINS CARBON DIOXIDE FLOODING BASIC MECHANISMS AND PROJECT DESIGN

International Human Resources Development Corporation, 1984

二氧化碳驱油机理及工程设计

〔美〕 M.A. 克林斯

程绍进 译 罗英俊 校

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社激光照排排版

北京石油附中校办厂印刷

新华书店北京发行所发行

850 × 1168 毫米 32 开本 10 印张 259 千字 印 1—1,800

1989 年 6 月北京第 1 版 1989 年 6 月北京第 1 次印刷

定价: 3.35 元

ISBN 7-5021-0202-7 / TE · 198

目 录

引言与概述	(1)
第一章 提高石油采收率述评	(3)
第一节 美国的剩余储量	(6)
第二节 提高石油采收率的潜在产量	(7)
第三节 确定采收率的因素	(11)
第四节 提高石油采收率的方法	(14)
一、烃类混相法	(15)
二、化学法	(18)
三、热力法	(21)
四、二氧化碳法	(24)
第五节 应用筛选标准	(26)
参考文献	(26)
第二章 采油机理	(28)
第一节 驱替效率 E_D	(28)
第二节 面积扫油效率 E_A	(35)
第三节 垂向扫油效率 E_V	(42)
一、重力超覆	(42)
二、垂向非均质性	(50)
第四节 活化效率 E_M	(53)
第五节 采收率的计算实例	(57)
一、非混相驱：水平地层中的聚合物驱	(57)
二、混相驱：均质倾斜层中的二氧化碳驱	(62)
参考文献	(67)
第三章 二氧化碳与原油的相互作用及其对采油的影响	(69)
第一节 纯二氧化碳的性质	(69)

一、气体压缩系数 Z	(69)
二、气层体积系数 B_g	(71)
三、密度 ρ	(72)
四、粘度 μ_g	(75)
五、焓 H	(75)
第二节 二氧化碳驱替液	(77)
第三节 低压应用	(82)
一、天然气与原油特性的评价	(87)
二、二氧化碳与原油系统	(96)
第四节 中间压力、高温 ($>122^{\circ}\text{F}$) 的应用	(101)
第五节 中间压力、低温 ($<122^{\circ}\text{F}$) 的应用	(107)
第六节 高压混相的应用	(108)
一、多相接触混相能力	(111)
二、预测混相能力的相关性	(113)
第七节 气水界面的特点	(121)
一、水与天然气系统的评述	(121)
二、二氧化碳-水系统	(129)
第八节 岩石-流体特性	(133)
一、岩石压缩系数 c_r	(133)
二、相对渗透率 k_{ro} 、 k_{rw} 、 k_{rg}	(133)
三、界面张力效应	(134)
四、沥青沉降作用	(138)
第九节 模拟二氧化碳-油相的动态	(138)
第十节 二氧化碳与原油系统: 典型的室内试验	(143)
一、恒定组分膨胀试验 (或闪蒸试验)	(144)
二、恒定体积递减试验	(145)
三、差异放出试验	(146)
四、分离器试验	(147)
五、特殊室内试验的种类	(147)
第十一节 室内数据的误差	(155)

一、油藏流体取样	(155)
二、样品的一致性	(155)
三、室内测量精度	(156)
四、误差处理	(156)
第十二节 混相注气模型的数据要求	(156)
一、原油特性	(158)
二、适合非混相二氧化碳驱工程的二氧化碳与 原油的特性	(160)
三、适合混相二氧化碳驱工程的二氧化碳与 原油的特性	(160)
第十三节 伪组分	(160)
参考文献	(163)
第四章 油藏模拟方法	(170)
第一节 油藏模拟的类别	(170)
第二节 连续性方程	(172)
第三节 模拟二氧化碳驱替方法	(176)
一、黑油模型	(176)
二、组分模型	(177)
三、混相驱	(179)
第四节 模拟模型的应用及优缺点	(180)
一、黑油非混相模型	(180)
二、黑油混相模型	(181)
三、组分模型	(182)
四、混合混相及组分模型	(184)
第五节 科瓦尔与托德-朗斯塔夫混相模型比较	(184)
一、黑油混相模型的混合参数	(184)
二、科瓦尔的常规组分模拟	(189)
第六节 模拟注气和生产井的相动态	(192)
一、单相流动的摩擦系数	(193)
二、注液态二氧化碳中的两相流	(193)

第七节 附录	
组分模拟连续方程的推导	(197)
第八节 附录	
重油模拟连续方程的推导	(204)
第九节 附录	
流动方程有限差分近似法及它们的解	(207)
参考文献	(212)
第五章 现场应用筛选	(216)
第一节 关键的油藏参数	(217)
一、二氧化碳混相法	(220)
二、二氧化碳非混相法	(223)
三、一般筛选标准(混相与非混相)	(224)
四、二氧化碳单井增产措施	(231)
第二节 一种预测模型的目的	(234)
第三节 采收率预测方法	(235)
一、卢因法	(238)
二、改进的科瓦尔法	(240)
三、油带分相流动(线性法)	(246)
四、油带分相流动(五点法)	(248)
五、一般 DOE / NPC 二氧化碳预测模型	(253)
第四节 模型的合理性	(254)
一、卢因法	(254)
二、改进的科瓦尔法	(255)
三、油带分相流动(线性模型)	(257)
四、油带分相流动(五点法)	(257)
五、一般二氧化碳预测模型	(259)
第五节 附录	
改进的科瓦尔反五点法	(261)
参考文献	(265)
第六章 工程的经济性及其设计	(268)

第一节 先导试验前的估价	(268)
一、工程的经济性	(268)
二、进一步的数据要求	(275)
第二节 数值模拟	(277)
一、黑油非混相模型	(279)
二、组分模型	(279)
三、黑油混相模型的混合参数	(280)
第三节 先导试验	(282)
一、设计分析	(283)
二、地层分析	(283)
三、施工问题分析	(284)
四、先导试验的实施	(285)
第四节 现场试验	(287)
一、混相应用	(287)
二、非混相应用	(289)
三、油藏反应	(296)
第五节 最终设计	(301)
参考文献	(304)
附录 单位换算表	(308)

引言与概述

为提高石油采收率，人们已在实验室内和矿场上对许多工艺进行了研究。目前的技术和经济状况是每从地下采出一桶石油仍有两桶留在地下。为了理解这一论点的含意，我们设想，如果将美国的石油采收率提高 1%，就可多产出近 40 亿桶的石油。这远远多于美国一年的产量。

为采出这些储量而采用的常规技术有：蒸汽驱、火烧油层、化学驱和注氢氧化物（第一章）。但在目前，由于二氧化碳具有广泛的适用范围，人们对利用二氧化碳（ CO_2 ）开采轻、重质油产生了极大的兴趣。

本书首先讨论为什么 CO_2 能够使石油流动和驱替石油及有哪几种机理起到了提高采收率的作用。这些机理（第二章中讨论）与油藏温度、驱替压力和原油的物性有关。注 CO_2 除了能提高天然能量驱动的作用过程外，还能降低原油的粘度，增加弹性气驱的溶解气量，而且还能产生潜在的混相能力。

要探讨 CO_2 为什么能够驱替原油则必须对 CO_2 、水和原油之间的相互作用进行分析。第三章描述了对它们的分析，不仅提出了 CO_2 与地层流体的反应情况，而且还指出了精确预测油藏对 CO_2 反应所必需的数据。该章还讨论了取得这些数据所需要的实验室试验。

然后再根据岩心、测井曲线、产量变化情况以及压力—体积—温度（PVT）数据，预测注 CO_2 后的反应效果。对从事这项工作的工程师来说，有几种预测方法可以采用。各种方法都涉及到油藏模拟，但迄今为止还没有设计出可靠的分析方法。一些最普遍使用的预测方法将在第四章中讨论。该章还包括：驱替压力很低情况下的黑油模拟；注 CO_2 压力很高情况下的混相模型及

适用于大多数过渡压力情况下的组分模拟。

第五章综述了注二氧化碳已取得成功的油藏类型。其中包括主要油藏参数的筛选实例，为什么这些参数会限制 CO_2 的适用性和怎样确定这些主要参数。

第六章描述了 CO_2 注入工程的现场设计，即必须筛选和模拟油藏，做先导试验和安装现场设备。数据收集、工艺模拟以及经济分析的现场实例均穿插在本章及前几章中。

无疑，提高石油采收率将对未来的石油开采做出重大贡献。并且，注二氧化碳也将为提高石油采收率而发挥重要作用。鉴于这种前提，我编写了本书。

第一章 提高石油采收率述评

一种对能量需求的新的认识正在迫使全世界对如何维持其未来一代的经济作出反应。150 多年以来，人类遵循着不断发展的规律，一直不断地从地球有限的能量储库中取出廉价、丰富的燃料。

今天，石油已在世界范围内以每秒钟 3 万加仑的速度被采出，而在美国一年中的每天每秒钟就用掉其中的 0.9 万加仑。尽管美国人仅占世界人口的 6%，但他们用去了整个世界能源的 25%，其中 30% 是石油。这些石油在美国能源范围内起到了主要作用，并且约占美国能源消耗量的一半。如图 1.1 所示。石油不仅在当今的世界中发挥了主导作用，而且预计在未来几十年中仍将保持这一状况（“Winter's Legacy”1977）。

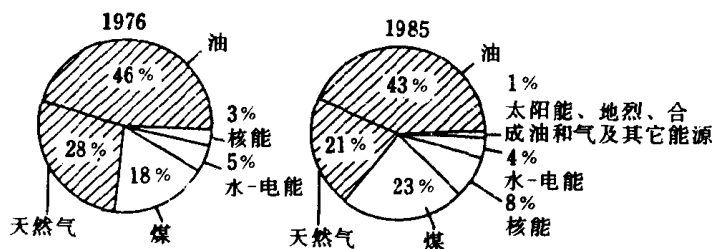


图 1.1 美国各种能源的消费情况

尽管石油价格在过去的十年中几乎增长了 10 倍，但人们对石油产品的需求仍然有增无减（见图 1.2）。

面对着对石油的这种需求，美国国内没有生产这么多石油的能力，因此只好靠每年进口 20 亿桶石油来弥补。工业上之所以无法满足这种日益增长的需求主要原因有三个：

- 1. 价格；
- 2. 后备储量不足；
- 3. 开采效率低。

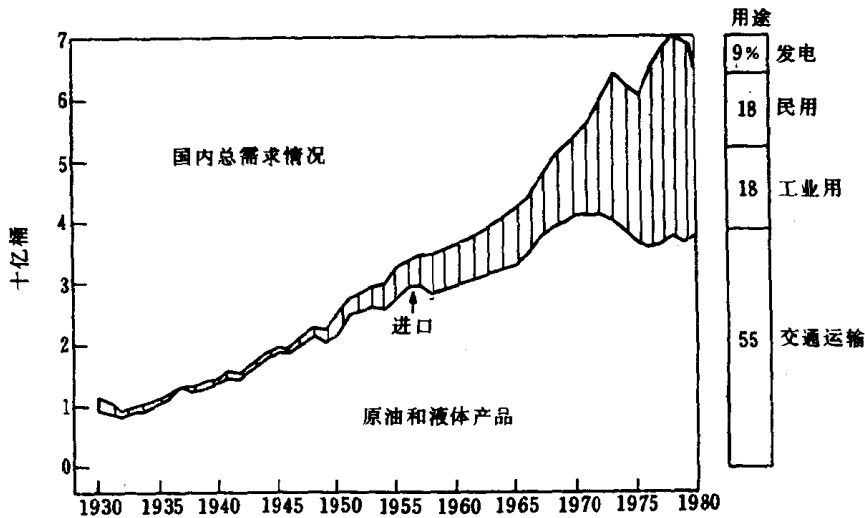


图 1.2 美国的石油供应和需求状况

美国的石油价格已在过去进行过调整。它比国际市场的石油价格偏低，从而助长了美国消费者的挥霍并保持高的需求量，许多油田的生产也因此有可能继续进行下去。这样一来不仅使开发和生产现有储量的成本日趋提高，而且也使目前探明新储量的任务远比过去困难得多。

图 1.3 示出了美国地下石油的最终开采量，并发现这些储量所需年限之间的关系。除了在普拉德霍湾发现的 100 亿桶石油

外，美国的石油发现率在过去的 20 年中平均每年不到 10 亿桶。图 1.3 还列出了国内石油的产量。由此可以看出，美国近年来的石油产量已停留在年产 30 亿桶的水平上。这标志美国的消费量与新探明的储量之间存在着极为悬殊的差别。

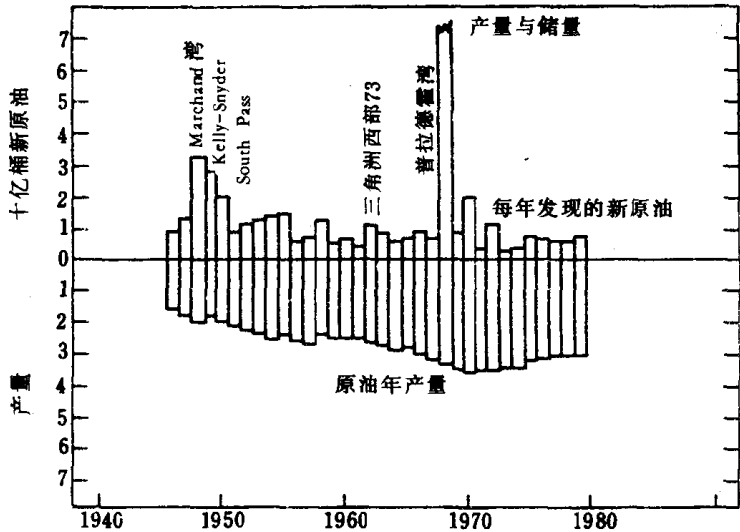


图 1.3 新发现的石油对美国已探明石油
储量的贡献 (Moody 1978)

伴随多数大油田的早期发现接踵而来的问题是，如何用我们的能力去开采它们之中的极大部分石油。许多早期发现的油藏具有较高的渗透率和较强的天然水驱，从而使我们对进一步开发新发现的油田充满了信心。图 1.4 示出了采收率与时间的关系。其中从 1920 年到 1940 年的开发趋势清楚地表明，未来的采收率将超过地下石油的 50%。可惜的是较新油田的自然产油能力不如原来的老油田。图 1.4 还示出，人们只能采出发现石油储量的 30%。也就是说，每生产一桶石油，仍有两桶留在地下。

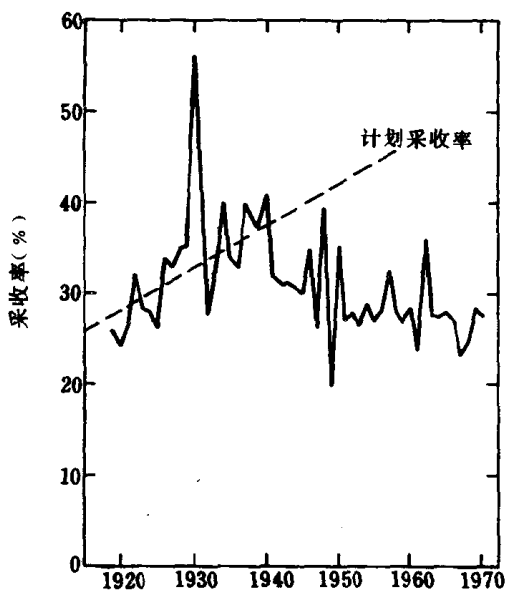


图 1.4 美国的石油采收率随时间发生变化
(Doscher 和 Wise. 1976)

第一节 美国的剩余储量

为了改变勘探和产量持续下跌而需求和价格日趋上升这种局面，石油工业必须力争拿下圈闭在多年前就已探明的油藏中的大部分剩余石油储量。一想到这些未被采出的石油，就更增添了在不久的将来对工业和经济的诱惑力。

美国从 1859 年以来已探明了 4600 亿桶的石油储量，但目前的采油技术只能采出 148 桶（约占 32%）。相反，如将现在的这些油田废弃，那么，将有 3120 亿桶石油——68% 永远留在地下。如图 1.5 所示。

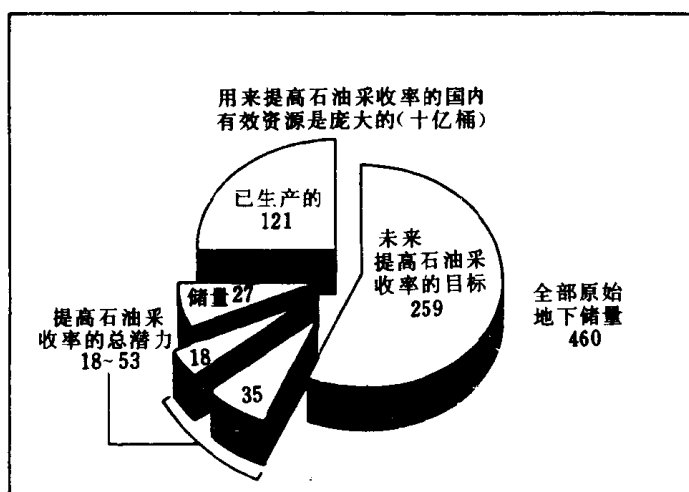


图 1.5 美国的三次采油情况 (Johnson 1982)

第二节 提高石油采收率的潜在产量

如图 1.5 所示, 采用提高石油采收率技术, 预计可生产出 180~530 亿桶石油。考虑到美国列入用常规采油技术可采的石油储量只有 270 亿桶, 因此, 通过提高石油采收率工艺开采的剩余储量是十分可观的。表 1.1 列出了用不同开采方式开采这些潜在储量的分类情况。其中, CO_2 驱的应用范围最广, 产量可达 210 亿桶。表中还列出了每种工艺的成本估算和采收率。

尽管实验室和先导试验已经证明了开采剩余石油各种技术的能力, 但图 1.6 和 1.7 表明, 目前靠提高石油采收率技术生产的石油仅占美国总产量的 4%。而且其中三分之二是属于一种技术开采的——加利福尼亚蒸汽驱开采的重质原油。为了使提高采收率技术富有生机, 不仅要提高石油采收率, 而且也必须以经济有效的手段进行开采。

表 1.1 提高石油采收率技术可采的潜在储量及成本预算

采油方法	每桶成本 (美元)	采收率 (%)	目前技术	潜在储量 (十亿桶) 先进技术
蒸汽驱	21~35	25~64	4.0	13.0
火烧油层	25~36	28~39	1.6	0.4
聚合物驱	22~46	0~4	0.3	0.6
胶束 / 聚合物驱	35~46	30~40	5.0	7.0
CO ₂ 混相驱	26~39	15~19	7.0	14.0

摘自: H. R. Johnson, *Outlook for Enhanced Oil Recovery*, DOE internal report, Bartlesville, Okla. (1982)

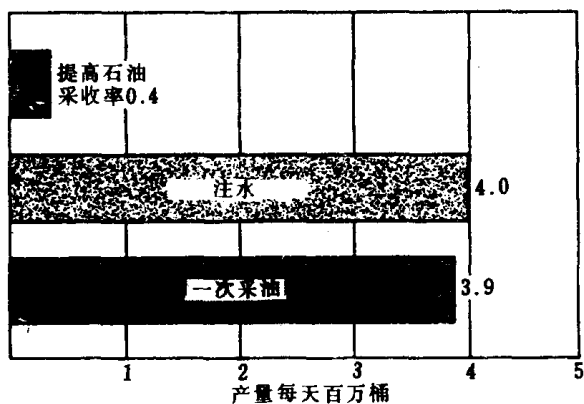


图 1.6 目前的石油产量 (1980) (Johnson 1982)

经济的吸引力蕴涵着两层含义，一是实行一项提高石油采收率技术的成本要低于最终多采出的原油价值；二是该技术经费支出和收入的时机应能取得令人满意的现值利润。当前，正是这个利润问题而不是大多数提高石油采收率的可行性限制了它们的应用。

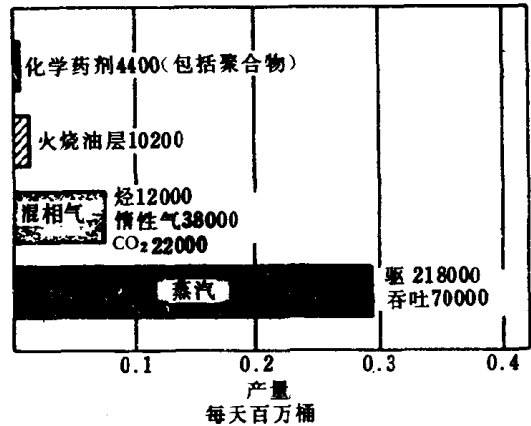


图 1.7 提高石油采收率技术的产油量 (1982)
 (“年产量报表”1982)

如表 1.2 所示，人们对提高采收率方案的兴趣在过去的几年中已经有所提高，这表明经济趋势可能变得越来越有利于这些工艺。但是，在提高石油采收率真正成为可行的能源补充方法之前，还需要做漫长的先导试验，提高石油价格，为提高石油产量施行新的税收鼓励政策和固定的管理政策。以目前每天增产 38.5 万桶的石油计算，到 1995 年，提高石油采收率完全有可能实现每天增产 100 万到 400 万桶石油（如图 1.8 所示）。预计，目前提高的采收率比率占国内产量的 4%，而 1995 年较高水平的采收率比率将等于美国目前全部石油产量的一半左右。